

ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO DE CÉLULAS TESTE DOTADAS DE TETO RESERVATÓRIO EM CLIMA SUBTROPICAL

Leandro Fernandes (1); Eduardo Krüger (2); Francine Aidie Rossi (3)

(1) Mestre, Professor do Departamento de Expressão Gráfica, fernandes.ufpr@gmail.com Universidade Federal do Paraná, Rua Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Centro Politécnico, Jardim das Américas, Curitiba, Paraná

(2) Doutor, Professor do Departamento de Engenharia Civil, ekruger@utfpr.edu.br Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba - Sede Ecoville, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900, 81280-340 Curitiba, Paraná

(3) Doutora, Professora do Departamento de Expressão Gráfica, rossi@ufpr.br Universidade Federal do Paraná, Rua Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Centro Politécnico, Jardim das Américas, Curitiba, Paraná

RESUMO

O condicionamento térmico de edificações localizadas em clima subtropical pode implicar em grande consumo de energia, o qual pode ser minimizado se adotadas técnicas passivas para condicionamento. Entre os componentes de uma edificação térrea ou de poucos pavimentos, a cobertura é particularmente interessante para condicionamento térmico por estar em contato com grande parte dos cômodos e ser a via pela qual ocorre a maior parte dos ganhos térmicos no verão e a maior parte das perdas térmicas no inverno. Uma das estratégias para condicionamento a partir da cobertura é o Teto Reservatório (TR), cujos estudos no Brasil ainda são escassos e focam apenas no resfriamento. Porém, para maior proveito deste tipo de instalação em climas subtropicais com necessidades de aquecimento, é interessante que o TR opere ao longo de todo o ano, contemplando inverno e verão. Este estudo tem por objetivo avaliar o desempenho térmico de células teste dotadas de teto reservatório para condicionamento térmico em Curitiba, PR. Foram avaliadas seis diferentes coberturas com TR, sendo cinco delas com o reservatório preenchido por água. Os resultados confirmaram a versatilidade do TR enquanto alternativa para condicionamento das células teste em questão.

Palavras-chave: condicionamento térmico passivo, teto reservatório, células teste.

ABSTRACT

Indoor thermal conditioning in subtropical climates can bring along increased energy demand, which can be in part reduced by means of passive heating/cooling techniques. Among the building elements of a single-storey or low-rise buildings, the roof is particularly interesting for room conditioning as such element is in contact with most of the rooms and as the roof is responsible for most of the heat gains in summer and most of the heat losses in winter. One of the passive strategies for roofs consists of roof ponds; studies in this regard are still scarce in Brazil and focus only on passive cooling. However, in subtropical conditions with heating needs, it is interesting that a roof-pond system operates throughout the year, including winter and summer periods. The study aims to evaluate the thermal performance of test cells with a roof-pond element for indoor thermal conditioning in Curitiba, PR. Six different roof-pond types were evaluated, five of them with the reservoir filled with water. Results confirmed the versatility of the passive roof-pond system as an alternative for indoor passive heating/cooling.

Keywords: indoor passive conditioning, roof pond, test cells.

1. INTRODUÇÃO

O condicionamento térmico de edificações em climas subtropicais, com inverno e verão bem definidos e com amplitude térmica diária significativa, pode implicar em grande consumo de energia. Esse consumo pode ser minimizado se adotadas medidas passivas para condicionamento. Olgyay (2008, p.10), quando relaciona arquitetura, clima e necessidades humanas, argumenta que “o processo lógico é trabalhar com as forças da natureza e não contra elas, aproveitando suas potencialidades para criar condições de vida adequadas”.

Dentre os componentes de uma edificação passiva, são particularmente importantes para a regulação das condições ambientais internas aqueles que constituem a envoltória do edifício: cobertura, paredes e aberturas. Dentre estes, cabe destacar o papel da cobertura.

A cobertura é o componente da edificação mais exposto ao clima externo (LAMBERTS, 1988). Também é o elemento da edificação que recebe maior intensidade de radiação solar em edificações horizontais (ANDRADE; RORIZ, 2009). A carga térmica recebida pela cobertura em uma edificação térrea pode chegar a mais de 70% de sua carga térmica total, em algumas épocas do ano (MASCARÓ, 1992 *apud* PERALTA, 2006), o que pode vir a ser um problema nos períodos quentes.

No inverno, na maioria das habitações brasileiras, a cobertura também é o meio pelo qual ocorrem as maiores perdas de calor, principalmente nas noites de céu claro, quando as perdas por radiação fazem com que a superfície externa da cobertura atinja temperaturas abaixo da temperatura do ar externo. No verão, por outro lado, especialmente em edificações de baixo custo, coberturas de baixo desempenho são ainda mais problemáticas (LAMBERTS, 1988).

Dada a importância da cobertura para o condicionamento passivo, diferentes materiais vêm sendo testados no Brasil quanto ao desempenho térmico. Também estão sendo testadas tecnologias passivas. Dentre elas, citam-se: resfriamento de coberturas por aspersão (TEIXEIRA; LABAKI, 2006; MASIERO, 2006); resfriamento evaporativo por aspersão e resfriamento radiante noturno (LABAKI; TEIXEIRA; TAVARES, 2005) e coberturas verdes com alta inércia térmica (IBIAPINA *et al.*, 2010; ANDRADE, RORIZ, 2009).

Uma tecnologia para condicionamento passivo aplicada em coberturas e pouco estudada no Brasil é o Teto-Reservatório (TR). O termo teto-reservatório denomina sistemas que incorporam na cobertura um tanque d'água para estocar, trocar ou dissipar calor (ERELL; YANNAS; MOLINA, 2006). O teto reservatório pode estar em contato direto com o ambiente abaixo ou separado deste por um forro. Os poucos estudos realizados até o momento tiveram como foco o resfriamento evaporativo em períodos quentes. Há, desta forma, uma demanda por estudos que avaliem as possibilidades de aplicação do teto reservatório para condicionamento ao longo de todo o ano no clima subtropical, incluindo os períodos frios.

2. OBJETIVO

Este estudo tem por objetivo avaliar o desempenho térmico de células teste dotadas de teto reservatório para condicionamento térmico sob condições climáticas subtropicais.

3. MÉTODO

Este trabalho avalia o desempenho térmico de células teste dotadas de diferentes tipos de teto reservatório. Para a avaliação, foram construídas células teste cujo teto foi alterado ao longo dos experimentos. Para comparação e análise do desempenho foram definidos parâmetros calculados para dias específicos. Os procedimentos são detalhados a seguir.

3.1 Clima local

Curitiba situa-se ao sul do Trópico de Capricórnio, no primeiro planalto paranaense, a 110 quilômetros do Oceano Atlântico. Possui latitude 25° 31' S, longitude 49° 10' W e altitude média de 911 m (IBGE, 2015). Na classificação de Köppen-Geiger, o clima predominantemente é do tipo Cfb, clima temperado ameno, com chuvas o ano todo e verão ameno (KOTTEK *et al.*, 2006). As precipitações são da ordem de 1.600 mm anuais, com sazonalidade (redução do volume de precipitação no inverno) (IPPUC, 2015). As normais climatológicas (1961-1990) indicam que nos meses do trimestre mais quente a média das temperaturas do ar é de 20°C. O mês mais quente é fevereiro e a média das suas máximas é 26,7°C (INMET, 2015). O trimestre mais chuvoso compreende dezembro, janeiro e fevereiro. O trimestre mais seco e frio compreende junho, julho e agosto.

No Zoneamento Bioclimático Brasileiro, a cidade está na Zona Bioclimática 1 (ABNT, 2003), sendo a capital mais fria do país. Considerando a carta bioclimática adaptada por Bogo *et al.* (1994), as principais

estratégias passivas para o clima de Curitiba são: alta inércia térmica associada ao aquecimento solar (38,8% das horas); aquecimento solar passivo (14,6%); ventilação (7,98%); aquecimento artificial (5,54%); e sombreamento. O resfriamento evaporativo, cujo potencial poderia ser explorado em condições de verão por meio de TRs, é recomendado para apenas 0,08% das horas do ano.

3.2 Células teste

Foram confeccionadas células teste (Figura 1), as quais receberam coberturas que variaram de acordo com os objetivos específicos de cada etapa. Para confecção das paredes e piso, utilizou-se compensado naval com 15 mm de espessura. Para resistir às intempéries, as células receberam como base uma camada de verniz marítimo. Posteriormente foram pintadas com acrílico esmaltado na cor branca. Internamente, paredes e pisos foram revestidos com uma camada de 4,5 cm de poliestireno expandido (EPS).

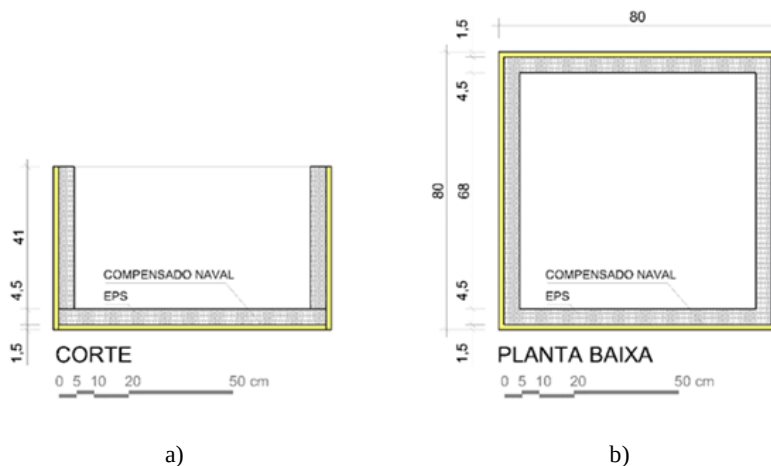


Figura 1 - Corte (a) e Planta Baixa (b) da Célula Teste.

Buscou-se replicar as células teste conforme as confeccionadas por Gonzalez *et al.* (2014) em seu Experimento 1. Porém, visando maior durabilidade, ocorreram pequenas alterações: ao invés de madeira compensada simples, se utilizou compensado naval; as células-teste originais foram confeccionadas com chapas de 18 mm, aqui se utilizaram chapas de compensado naval de 15 mm. As espessuras das chapas de EPS e o volume de ar interno correspondem aos do experimento original. A alteração na espessura das chapas de compensado levou a uma leve diferença entre os experimentos em se tratando da transmitância térmica das paredes das células (as células-teste de GONZALEZ *et al.* (2014) apresentam $U=0,717 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ enquanto as deste experimento apresentam $U=0,707 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (Figura).



Figura 2 – Confeção (a) e aspecto final (b) da Célula Teste.

Fonte: Arquivo autores.

As configurações testadas neste artigo utilizam dados gerados a partir de uma ou duas células teste (quando o monitoramento ocorreu simultaneamente) contendo uma bacia/teto reservatório como elemento de cobertura. O teto reservatório (TR) foi confeccionado com chapa de aço galvanizado de espessura 1,2 mm, recebendo ainda uma camada de tinta epóxi para prevenir ferrugem e pintura com tinta acrílica branca. A função dessa bacia metálica é tornar mais efetivo o processo de resfriamento do ambiente a partir do processo de evaporação da água e/ou aumento da massa térmica no reservatório, evitando-se gerar aumento da capacidade térmica do teto-reservatório além do próprio corpo d'água. Para os experimentos reportados,

quando pertinente, o TR recebeu uma camada de 6,5 cm de água.

Sobre o TR, de acordo com o tipo de teste realizado, foram utilizados diferentes tipos de cobertura: placa de sombreamento, tampa de vedação e *sheds*. A placa de sombreamento é composta por compensado naval de 10 mm de espessura, envernizado, pintado na cor branca e revestido em sua face inferior com chapa de EPS de 1,5 cm de espessura. A tampa de vedação foi igualmente montada com madeira compensada, revestida com 4,5 cm de EPS, a qual foi separada por câmara de ar não-ventilada do TR, o qual foi vedado com chapa metálica de mesmo material que a bacia metálica, com aplicação de silicone. Os *sheds*, montados com madeira compensada, com inclinação em 45°, receberam também por baixo uma camada de isopor de 1,5 cm, à semelhança da placa de sombreamento.

3.3 Monitoramento

O monitoramento de dados do período entre 05/2015 e 01/2016 foi realizado em um condomínio residencial. De 09/2016 até 10/2016 os testes foram conduzidos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba, Sede Ecoville. Ambos os locais se situam à região Leste de Curitiba, distam um do outro em cerca de 6 km e as condições de entorno são semelhantes, com pouco adensamento urbano. As células teste foram distanciadas de modo que não projetassem sombras uma sobre a outra. As temperaturas internas do ar foram registradas por meio de *data loggers* da marca NOVUS, modelo LogBox-RTH-LCD. O sensor desse aparelho opera na faixa de temperaturas de -40,0°C a 80,0°C, com resolução de 0,1°C e tempo de resposta de até 30 s em ar em movimento lento. As temperaturas externas foram obtidas por uma estação meteorológica da marca HOBO®, modelo H21-001. Os sensores foram programados para realizar medições a cada 15 minutos, posteriormente os dados foram convertidos para base horária.

3.4 Verificação da similaridade de desempenho das células teste

Para possibilitar a comparação das células com diferentes configurações, foi realizada análise das células com mesma configuração. Durante três dias (30/09 a 02/10/2016), as duas células (denominadas ‘CT1’ e ‘CT2’) receberam a mesma quantidade de água, isto é, o teto reservatório foi preenchido com 10,5 cm d’água e coberto com a tampa de vedação. Os dados dos dois primeiros dias foram descartados, para que houvesse estabilização das temperaturas internas nas células. A diferença média de temperatura entre as células teste foi de 0,09 °C e a diferença máxima 0,40 °C, consideradas aceitáveis diante da precisão do equipamento, com erro de até 0,5 °C (Figura 3).

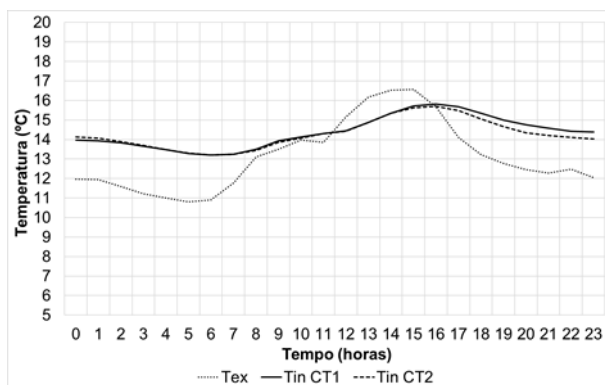


Figura 3 – Aferição das células teste

3.5 Configurações das células teste

De um total de 21 configurações de TR na pesquisa, para a série de experimentos analisada neste artigo foram consideradas seis configurações de células teste.

Configuração 1 – TR Vazio (Figura 4). A bacia não é preenchida com água, o conjunto é tampado (placa de sombreamento), sem ventilação permanente. O monitoramento abrangeu seis dias, de 20/09 a 25/09/2016.

Configuração 2 - TR Massa Térmica (Figura 5). Esta célula teste foi configurada para verificar o potencial de estabilização térmica e para servir de referência para as células configuradas para aquecimento ou resfriamento. O TR é coberto por uma tampa de vedação e vedado com chapa metálica. O monitoramento abrangeu 29 dias, de 24/05 a 21/06/2015.

Configuração 3 - TR Resfriamento Evaporativo Descoberto (Figura 6). Nesta configuração, a lâmina d'água foi exposta ao ambiente externo sem qualquer proteção, possibilitando evaporação, ganhos solares e perdas por convecção. O reservatório foi pintado de branco para limitar os ganhos térmicos por radiação solar. A reposição do nível do reservatório ocorria pela manhã, antes da incidência dos raios solares, sendo utilizada água à temperatura ambiente. O monitoramento ocorreu durante três dias de verão, de 19/01 a 21/01/2016.

Configuração 4 - TR Resfriamento Evaporativo Coberto (Figura 7). Nesta configuração, o reservatório recebeu a placa de sombreamento, com ventilação permanente. O período abrangeu três dias de verão, de 19/01 a 21/01/2016, coincidindo com a configuração 3.

Configuração 5 - TR Coletor Solar (Figura 8). Foi configurada para verificar a possibilidade de aquecimento, foram aplicadas duas camadas de vidro sobre o TR. A primeira (vidro comum 4 mm), ao nível da superfície d'água, para garantir vedação, e a segunda (vidro 6 mm), 4 cm acima da outra, para criar um colchão de ar não-ventilado. O reservatório foi pintado de preto para maximizar os ganhos por radiação solar. O período de testes abrangeu 12 dias de inverno, entre 27/07 e 07/08/15.

Configuração 6 - TR Coletor Solar com *sheds* (diurno) + Protetor (noturno) (Figura 9). Nesta configuração, o reservatório foi coberto por vidro 6 mm e por *sheds* inclinados em 45° durante o dia, sendo durante a noite coberto pela placa de sombreamento, simulando uma cobertura móvel com ventilação permanente. O período compreendeu dois dias de inverno, 01/09 e 02/09/16.

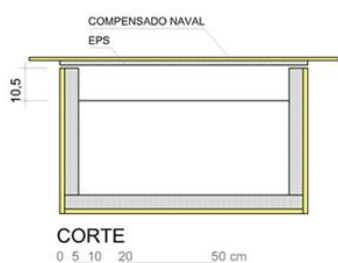


Figura 4 - TR Vazio

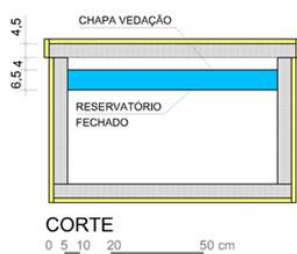


Figura 5 - TR Massa Térmica



Figura 6 - TR Resfr. Evap. Descoberto



Figura 7 - TR Resfr. Evap. Coberto

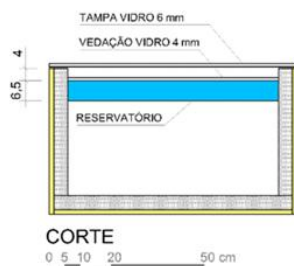


Figura 8 - TR Coletor Solar

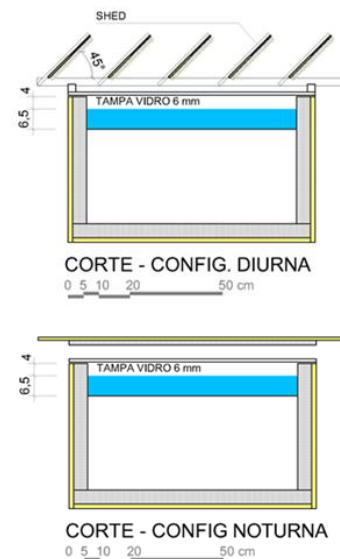


Figura 9 - TR Coletor Solar com Sheds (diurno) + Protetor (noturno)

3.6 Escolha de dia de céu claro

Considerando que para este estudo dispunha-se de apenas duas células teste e que não era possível testar as seis configurações concomitantemente, para fins de comparação, resolveu-se realizar as análises a partir de dados de dias específicos.

Deu-se preferência por dias de céu claro. Para a escolha destes dias calculou-se um coeficiente, denominado coeficiente de Dia Padrão (DP). Os dias com maior DP foram os adotados para as comparações. O DP permite selecionar, dentre os dias disponíveis, aqueles com maior amplitude térmica e com condições

relativamente estáveis. Dias cujas temperaturas dos dias anterior ou posterior sejam significativamente diferentes apresentarão automaticamente baixos valores para DP. O valor DP é calculado pela Equação 1.

$$DP = (T_{7h} - T_{14h}) - Abs(T_{7h} - T_{31h}) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

DP	é o coeficiente de Dia Padrão (referência), adimensional;
T_{7h}	é a temperatura às 7 horas daquele dia, em °C;
Abs	é a diferença absoluta (módulo), em grau Kelvin;
T_{14h}	é a temperatura às 14 horas daquele dia, em °C;
T_{31h}	é a temperatura às 7 horas do dia seguinte, em °C.

3.7 Parâmetro adotado para avaliação da estabilidade térmica

A bibliografia disponível é pouco objetiva em se tratando da estabilidade térmica no interior de edificações naturalmente ventiladas. No entanto, alguns trabalhos estabelecem limites para a amplitude térmica diária interna. Evans (2007) aponta a amplitude interna máxima de 8,3°C, proposta por Strickley¹. Givoni (1998), a exemplo de Olgyay (2008), propõe duas faixas de conforto para edificações naturalmente ventiladas: uma para inverno, de 18 a 25°C; e outra para verão, de 20 a 27°C. O autor também recomenda que o limite superior da zona de conforto seja ampliado em 2°C quando aplicada aos países em desenvolvimento. Ou seja, admite duas faixas de oscilação para a temperatura interna: 7°C para países desenvolvidos; e 9°C para países em desenvolvimento. Bogó *et al.* (1994) realizaram ampla revisão bibliográfica abordando o tema bioclimatologia aplicada com o objetivo de selecionar uma carta bioclimática a ser adotada para o Brasil. O trabalho apresenta revisão sobre pesquisas e propostas para a bioclimatologia. Por fim, aponta como adequada aos climas brasileiros a carta de Givoni com adaptações. Tais adaptações resultaram em um faixa de conforto que vai de 18 a 29°C, com uma amplitude térmica de 11°C.

As diferentes propostas citadas evidenciam que não há consenso quanto à amplitude térmica diária máxima admissível para edificações passivas. No entanto, fica evidente que os autores concordam que deve haver limites, ou seja, que o controle da amplitude térmica interna é necessário. Para verificar o nível de potencial para estabilização das temperaturas internas, utilizou-se neste trabalho o Fator Decremental (FD).

Fator Decremental (FD)

Expressa a relação entre as amplitudes diárias interna e externa (GONZALEZ, *et al.*, 2014). Quanto menor o FD, maior o potencial de estabilização das temperaturas internas. Este coeficiente pode ser utilizado para fins de comparação entre diferentes configurações. O FD é calculado pela Equação 2:

$$FD = \frac{A_{in}}{A_{ex}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

FD	é o Fator Decremental, adimensional;
A_{in}	é a amplitude térmica (temperatura máxima - temperatura mínima diárias) interna, em grau Kelvin;
A_{ex}	é a amplitude térmica externa, em grau Kelvin.

3.8 Parâmetro adotado para avaliação do desempenho quanto a aquecimento/resfriamento

O objetivo da adoção de um parâmetro comparativo foi o de verificar quais estratégias possibilitam aquecimento e quais possibilitam resfriamento. Ressalta-se que a inércia térmica, por si, não é considerada uma estratégia para resfriamento, visto que não refrigera a edificação, apenas reduz ganhos e perdas para o ambiente externo. Neste estudo, o principal parâmetro para verificar aquecimento e resfriamento existentes foi denominado o Coeficiente de Dissemelhança, explicado a seguir.

Coeficiente de Dissemelhança (CD)

Expressa a dissemelhança entre a temperatura interna média diária ($T_{in\ méd}$) e a temperatura externa média diária ($T_{ex\ méd}$). Mede o grau de diferença entre estas variáveis, indicando se, ao final do dia, o saldo foi aquecimento ou resfriamento. O CD não é expresso em graus Celsius, pois é uma taxa, sendo possível

¹ Strickley, B., (1978) The home owners guide for evaluating passive solar heating, pp 153-160, in Cook J. and Prowler, Eds., (1978).

comparar resultados oriundos de dias com diferentes amplitudes térmicas diárias. No caso de uma célula teste hipotética, onde as trocas térmicas ocorrem exclusivamente por condução e onde não operam artifícios para aquecimento ou resfriamento, a $T_{in\ méd}$ será igual à $T_{ex\ méd}$ e o CD terá valor próximo de zero (0,0). Havendo formas passivas de aquecimento, a $T_{in\ méd}$ será maior que a $T_{ex\ méd}$ e o CD será maior que zero. Havendo formas passivas de resfriamento, o coeficiente de dissemelhança será menor que zero.

O coeficiente de dissemelhança é calculado pela Equação 3:

$$CD = \left(\frac{T_{in\ méd} - T_{ex\ mín}}{T_{ex\ méd} - T_{ex\ mín}} \right) - 1 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

CD é o Coeficiente de Dissemelhança, adimensional;

$T_{in\ méd}$ é a temperatura interna média, em °C;

$T_{ex\ mín}$ é a temperatura externa mínima, em °C;

$T_{ex\ méd}$ é a temperatura externa média, em °C.

Para verificar se, para uma mesma configuração são obtidos CDs equivalentes em diferentes dias do ano, calcularam-se os respectivos CDs para duas configurações em diferentes datas.

A) Célula teste coberta e sem reservatório. Foi monitorada entre 29/10/14 e 22/11/14, 23/11/14 e 13/12/14 e entre 15/12/14 e 26/12/14. Para cada dia de cada período foram calculados os valores para DP. Os dias que apresentaram maiores DPs para cada um dos períodos foram 29/10/14, 07/12/14 e 17/12/14, respectivamente. Os CDs resultantes foram: 0,01, 0,03 e 0,03.

B) Célula teste com TR preenchido com 6,5 cm d'água e fechada. Os períodos de monitoramento foram de 27/12/14 a 10/01/15, 24/05/15 a 21/06/15 e entre 27/07/15 e 07/08/15. Os respectivos dias padrão foram 09/01/15, 05/06/15 e 30/07/15. Os CDs resultantes foram -0,11, -0,06 e -0,10, respectivamente.

Ou seja, os CDs obtidos para condições de céu claro geraram valores de mesma ordem de grandeza. A constância desses resultados, apesar de ter havido monitoramentos em diferentes dias e estações do ano, foi considerada adequada para que o CD fosse adotado como parâmetro para comparações entre diferentes configurações.

4. RESULTADOS

Neste tópico, são apresentados resultados gerais (Tabela 1), gráficos com as temperaturas internas e externas para dias específicos para cada uma das configurações analisadas e a discussão destes resultados.

Tabela 1 – Parâmetros para avaliação de desempenho

Configuração	Fator Decremental (FD)	Coeficiente de Dissemelhança (CD)
1-TR Vazio	1,53	0,33
2-TR Massa Térmica	0,32	-0,06
3-TR Resfriamento Evaporativo Descoberto	1,40	-0,24
4-TR Resfriamento Evaporativo Coberto	0,45	-0,58
5-TR Coletor Solar	1,60	1,57
6-TR Coletor Solar com Sheds (diurno) + Protetor (noturno)	2,32	3,48

4.1 Estabilização térmica

Comparando-se os dados das configurações 1 (TR Vazio) e 2 (TR Massa Térmica) verifica-se que, para as células teste avaliadas, a introdução de água no TR é uma alternativa efetiva para estabilização das temperaturas internas. Enquanto a configuração 1 (Figura 10) apresenta FD 1,53, ou seja, amplitude térmica interna 1,53 vezes maior que a amplitude térmica externa, a configuração 2 (Figura 11) resultou em FD 0,32.

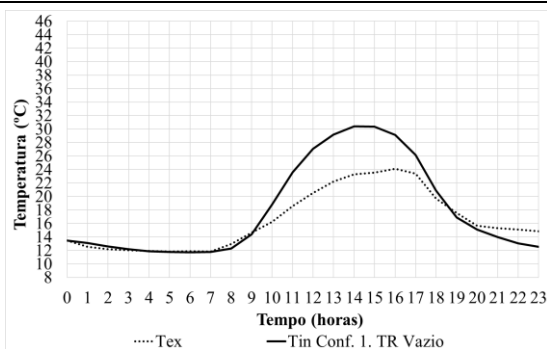


Figura 10 - Conf. 1, dia representativo 23/09/2016.

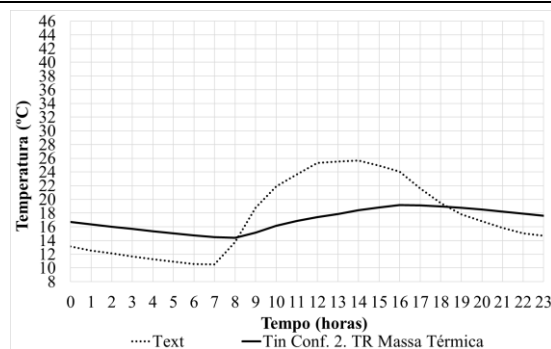


Figura 11 - Conf. 2, dia representativo 05/06/2015

Por outro lado, observou-se que o sombreamento, reduzindo ganhos devidos à radiação solar direta, também contribui para a redução do FD. Esse fato é evidenciado pela diferença entre os FDs das configurações 3 (TR Resfriamento Evaporativo Descoberto), com $FD = 1,40$, e 4 (TR Resfriamento Evaporativo Coberto), com $FD = 0,45$.

4.2 Resfriamento

Em se tratando de resfriamento e aquecimento, a configuração 2 (TR Massa Térmica) confirmou-se como referência para as demais, visto que o CD ficou muito próximo de zero ($-0,06$). Ou seja, nesta configuração, ao final do dia, não há saldos de calor importantes.

Comparando-se as configurações 2 e 3 (Resfriamento Evaporativo Descoberto, Figura), percebe-se que a configuração 3 é pouco efetiva em se tratando de resfriamento ($CD = -0,24$). Plotando os dados para o dia de céu claro (Figura 12), nota-se que as temperaturas internas permanecem inferiores às externas durante parte da manhã e à noite. No entanto, durante parte da tarde, quando o resfriamento é mais necessário, a situação se inverte, provavelmente devido à absorção da radiação solar pela massa d'água. Esse aumento da temperatura interna impacta o FD, que resultou em 1,40.

A configuração 4 (TR Resfriamento Evaporativo Coberto, Figura) difere da configuração 3 por possuir sobre o teto reservatório a placa de sombreamento. A não incidência de radiação solar direta resultou em melhora nos indicadores. O CD passou a $-0,58$, indicando maior resfriamento e o FD passou a 0,45. Observando-se o gráfico relativo ao dia de céu claro (Figura 13) percebe-se que o resfriamento foi menos efetivo no período noturno, provavelmente devido à menor movimentação do ar sobre a lâmina d'água devido ao elemento sombreador. No entanto, a configuração 4 mostrou-se mais efetiva que a configuração 3, especialmente nas horas mais quentes do dia.

Note-se que ambas as configurações foram monitoradas no mesmo dia.

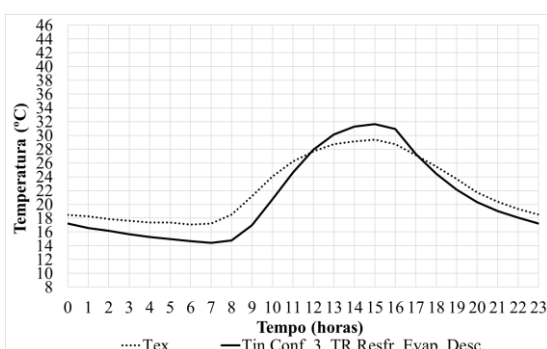


Figura 12 - Conf. 3, dia representativo 20/01/2016.

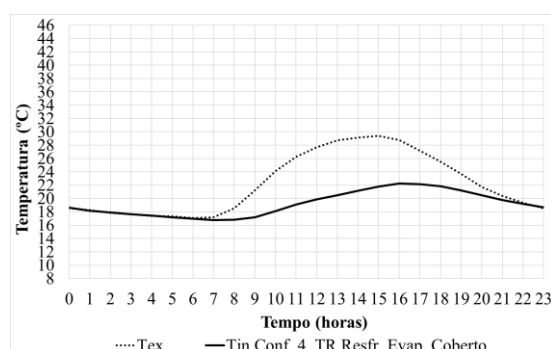


Figura 13 - Conf. 4, dia representativo 20/01/2016.

4.3 Aquecimento

Comparando-se a configuração 2 (TR Massa Térmica), com $CD -0,06$, com a configuração 5 (TR Coletor Solar, Figura 14), com $CD 1,57$, confirma-se a possibilidade de utilização do TR para aquecimento. No entanto, fica evidente que a configuração 5 necessita de um design mais elaborado para sua aplicação a condições subtropicais. Se por um lado as temperaturas mínimas foram elevadas para um patamar adequado quando comparadas às externas, as máximas indicam sobreaquecimento. Também a amplitude térmica diária

foi excessiva ($FD = 1,60$). São necessárias medidas para, evitando-se excessos, continuar ocorrendo aquecimento durante o dia no período frio e, ao mesmo tempo, reduzir as perdas de calor durante a noite, diminuindo assim a amplitude térmica e consequentemente o FD.

A configuração 6 (TR Coletor Solar com Sheds Diurnos e Protetor Noturno, Figura 15) foi monitorada em período com temperaturas externas e amplitudes térmicas diárias menores. No entanto, apresentou potencial de aquecimento ($CD = 3,48$) ainda maior que a configuração 5. Além de ter apresentado FD (2,32) maior. O desempenho diferenciado parece ser devido à tampa de sombreamento colocada sobre o reservatório no período noturno, reduzindo as perdas por radiação. No dia escolhido para a análise (Figura 14) as temperaturas mínimas internas ficaram muito próximas das máximas externas. Esta configuração mostra que é possível reduzir as perdas térmicas durante a noite. Por outro lado, é recomendável reduzir a área de exposição ao sol e aumentar o isolamento térmico noturno, assim diminuindo a amplitude térmica interna.

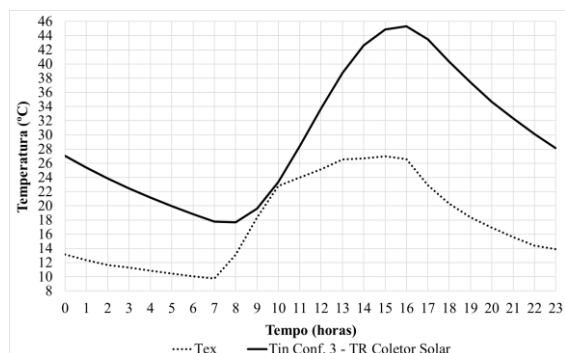


Figura 14 - Conf. 5, dia representativo 30/07/2015.

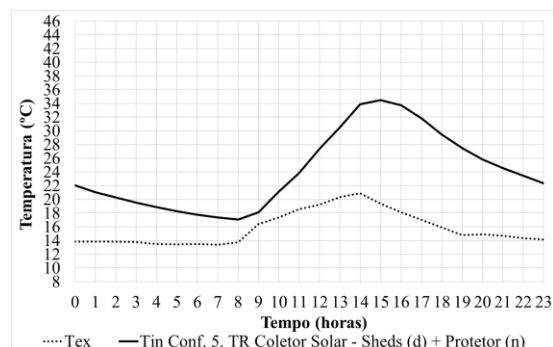


Figura 15 - Conf. 6, dia representativo 02/09/2016.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo avaliou-se o desempenho térmico de células teste dotadas de diferentes configurações de teto reservatório para condicionamento térmico em clima subtropical.

Para as células teste avaliadas, nas condições climáticas dos períodos monitorados, o teto reservatório mostrou-se uma alternativa versátil, apresentando desempenho bastante distinto quando alterados os seus modos de operação.

A massa d'água do reservatório, na configuração 2, diminuiu drasticamente a amplitude térmica diária interna quando comparada com a da configuração 1.

Para as células testadas, a configuração 4 mostrou que o teto reservatório é efetivo em se tratando do resfriamento. Se por um lado seu poder de resfriamento é limitado, há que se considerar que os verões de climas subtropicais são geralmente amenos sendo menor a demanda por resfriamento.

Quanto ao aquecimento, os dados das configurações 5 e 6 mostraram grande potencial para aquecimento e que os ganhos podem ser controlados por meio de aperfeiçoamentos na operação do TR.

Observou-se que o resfriamento evaporativo pode desempenhar um papel mais importante que o sugerido pela carta bioclimática, reduzindo as temperaturas nas horas mais quentes e consequentemente reduzindo a amplitude térmica, o que repercute na diminuição da necessidade de climatização artificial no período quente. Para períodos frios, seria necessário, em um primeiro momento, o desenvolvimento de modos de operação, os quais propiciem ganhos térmicos sem que ocorra sobreaquecimento e que reduzam as perdas térmicas noturnas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220** - Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ANBT, 2003.
- ANDRADE, Nixon César De; RORIZ, Maurício. Comportamento térmico de cobertura verde utilizando a grama *Brachiaria humidicola* na cidade de São Carlos, SP. **Parc.** v. 1, n. 4, p. 1–16, 2009.
- BOGO, Amílcar; PIETROBON, Claudio E.; BARBOSA, Miriam Jeronimo; GOULART, Solange; PITTA, Telma; LAMBERTS, Roberto. **Bioclimatologia Aplicada ao Projeto de Edificações Visando o Conforto Térmico**. Relatório Interno - 02/94 Florianópolis: 1994.
- ERELL, Evyatar; YANNAS, Simos; MOLINA, Jose L. **Roof cooling techniques: a design handbook**. London: Earthscan, 2006.
- EVANS, John Martin. **The Comfort Triangles: A New Tool for Bioclimatic Design**. 2007. Thesis - Technische Universiteit Delft, 2007.

- GIVONI, Baruch. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. **Energy and Buildings**. v. 28, n. 1, p. 25–32, 1998.
- GONZALEZ, Eduardo et al. Estudo experimental com sistemas de resfriamento passivo em Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2014, 15, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2014.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=410690>>. Acesso em: 17 abr. 2015.
- IBIAPINA, Marcia Barreto; SILVA, Vanessa Gomes da; ILHA, Marina Sangoi de Oliveira; KOWALTOWSKI, Doris C. C. K. Pesquisa experimental para avaliar a qualidade da água e a capacidade de retenção de água pluvial em coberturas verdes em Campinas - Brasil. In: SUSTAINABLE BUILDING 2010 BRAZIL. 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SindusCon-SP, 2010.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 14 abr. 2015.
- IPPUC - INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. **Website**. Disponível em: <<http://www.ippuc.org.br>>. Acesso em: 17 abr. 2015.
- KOTTEK, MARKUS et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.
- LABAKI, Lucila Chebel; TEIXEIRA, Carla Fernanda; TAVARES, Sérgio Fernando. Desempenho térmico de técnicas passivas em coberturas: resfriamento evaporativo e radiante. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 13, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.
- LAMBERTS, Roberto. **Heat Transfer Through Roofs of Low Cost Brazilian Houses**. 1988. Thesis - University of Leeds. Leeds, 1988.
- MASIERO, Érico. **Resfriamento evaporativo e condicionamento de ar convencional : estudo experimental comparativo**. 2006. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- OLGYAY, Victor. **Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 5a. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.
- PERALTA, Gizela. **Desempenho Térmico de Telhas: Análise de Monitoramento e Normalização Específica**. 2006. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- TEIXEIRA, Carla Fernanda Barbosa; LABAKI, Lucila Chebel. Resfriamento evaporativo em coberturas: estudo de caso em Campinas-SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2006, 11, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.